

LCR-ET20 弹簧型潮汐重力仪观测 结果的分析 and 比较*

孙和平 陈晓东 刘 明 周百力

(中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室)

摘要 基于武汉国际重力潮汐基准站 LCR-ET20 弹簧重力仪潮汐观测资料, 利用国际标准的数据预处理和分析方法, 采用与 GWR 型超导重力仪同址观测对比方法, 较系统研究了 ET20 仪器特征以及大气和海洋重力信号. 数值结果表明, 尽管 ET20 的观测精度要比超导型重力仪的精度低一个量级, 弹簧蠕变性导致的仪器漂移十分大, 但该仪器仍获得了与超导重力仪相当的潮汐参数, 能有效用于重力场的时间变化观测.

关键词 弹簧和超导型重力仪 大气和海洋影响 仪器特征研究

中图分类号: P312.4 **文献标识码:** A

引言

利用现代观测手段获得的固体地球潮汐变化信号, 可为人们认识地球的运动、形变和构造特征提供有效手段, 在了解地球深内部物质的运动中则更为有效. 近 20 年来, 随着地球物理学和大地测量学理论研究的不断深入, 全球重力场分布特征研究已取得了长足进展, 各种高精度重力仪的研制成功和广泛应用, 为研究地球重力场的微小变化提供了可靠保障(孙和平, 许厚泽, 1997). 近年来的研究表明, 在测定地球重力场的各类仪器中, GWR 型超导重力仪(SG)已被国际同行公认具有观测精度高、漂移率低、连续性和稳定性好以及观测线性范围宽等优点(Goodkind, 1991; 孙和平等, 1997). 然而, 由于该类仪器对环境稳定度要求高、仪器价格昂贵、体积笨重、安装复杂、技术要求和维护费用高, 因而, 仅适于长期定点高精度重力场的时间变化观测. 由美国拉科斯特-龙贝格(LaCoste-Rombourg, 简称 LCR)公司根据长周期立式地震仪原理设计的金属弹簧型固体潮(ET)相对重力仪是目前国际上使用较广、性能较好的一种相对重力仪. 与超导重力仪相比, 该类仪器具有价格便宜、体积小、安装简单和维护费用低等特点, 适用于野外定点重力观测. 在野外资源勘探、活动断层、地壳运动、地震监测和海洋潮汐研究等方面, 不失为一种有效工具. 中国科学院测量与地球物理研究所分别于 1981 和 1982 年从美国引进了两台 LCR 潮汐型(ET)重力仪(简称 LCR-ET20 和 LCR-ET21). 这两台仪器已有 20 年的历史, 它们仍然处于工作状态. 目前, ET21 重力仪在南极中山站工作, ET20 重力仪在武汉九峰地球动力学观测站与 SG 同址观测, 因此, 有必要对其性能作一系统的评估.

* 国家杰出青年基金(49925411)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-SW-131)共同资助.
2002-02-07 收到初稿, 2002-05-14 收到修改稿, 2002-06-05 决定采用.

ET20 重力仪属于机械反馈式重力仪, 初始的记录方式为模拟型. 1989 年通过与德国 Darmstadt 大学物理大地测量研究所合作, 采用德国的 SRW 方法安装了静电反馈型装置和数字采集系统. 数据采集系统软件采用汇编语言集成, 在 DOS 操作系统下运行 (Becker *et al.*, 1990). 2000 年利用可视 Basic 6.0 编程软件研制了新的数据采集系统 (2000 年 9 月 21 日安装, 10 月 19 日正式开始采集数据), 并更换了 A/D 转换器等外设, 使仪器在软硬件方面都得到更新^①. 重力潮汐数据采样密度为 s , 分辨率为 0.01 mV, 可人工控制输出记录读数. 九峰地球动力学观测站距市区 25 km, 台基稳固, 远离文明噪声, 受交通等人为因素影响小, 为仪器性能的对比分析提供了良好的观测环境. 本文将利用 2000 年 10 月 20 日~2001 年 7 月 23 日 ET20 弹簧和 GWR 超导重力仪同址观测数据进行对比分析, 研究安装数据采集系统后 ET20 仪器的观测精度、大气和海洋重力信号以及仪器长周期漂移特征.

1 数据处理技术

设定的 ET20 重力仪采样密度与超导重力仪采样密度同步, 原始采样密度为 20 s, 观测周期从 2000 年 10 月 20 日~2001 年 7 月 23 日 (共 270 天, 6 480 小时, 388 800 分钟). 与任何地表观测仪器一样, ET20 重力仪的输出量是电压变化值. 图 1 给出了经滤波处理后每分钟的潮汐观测 (图 1a) 和台站气压变化 (图 1e), 单位是电压变化伏 (V). 由图 1a 可知, 原始观测中存在许多非重力场信号, 即干扰信号. 这些干扰信号的起因较复杂, 有的是由于仪器本身导致的自动掉格 (又称阶跃), 有的是由于供电问题而导致的数据采集间断和由于电脉冲等原因产生的尖峰, 还有的是由于地震引起的振荡等等. 由于间断处用缺省值 9.999 表示, 远大于原始潮汐观测值, 在图中形成竖线, 两根竖线之间的部分即为观测间断. 根据统计可知, 总间断数为 7 465 分钟 (124.42 小时), 间断率约为 1.9%, 这是由于供电和数据采集系统出现问题所致. 由于数据间断和干扰信号会导致潮汐参数分析结果失真, 影

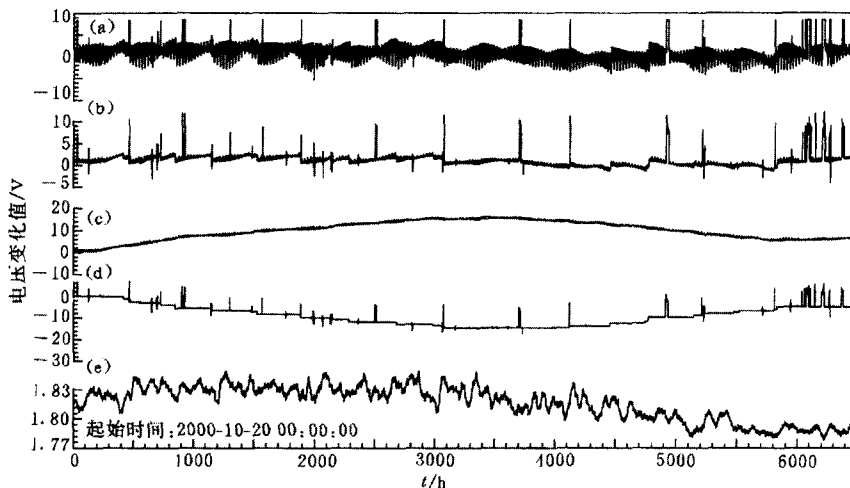


图 1 LCR-ET20 弹簧重力仪原始观测 (a)、残差 (b)、修正后残差 (c)、改正量 (d) 和台站气压变化 (e)

① 刘明, 孙和平, 郑少怀, 等. 2002. 基于虚拟仪器的 LaCoste-Romberg ET 型重力仪数据采集和显示系统. 中国科学院测量与地球物理研究所, 1~5.

响后续地球物理学和地球动力学应用解释, 因此, 在进行资料分析之前, 必须在不破坏重力场有效信号的前提下, 补充小间隔的间断和消除干扰成分。

基于 1998~1999 年同址超导重力仪高精度潮汐分析结果和主波振幅因子加权求和方法测定的 ET20 弹簧重力仪观测数据的记录格值为 $(42.418\ 3 \pm 0.004\ 0) \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{V}$ 。采用消除-恢复数据预处理方法, 首先将观测潮汐中的理论潮汐信号扣除, 获得残差的时间变化。这样做的主要目的是为了较好地显示各种噪声信号, 方便以人机对话方式实施各种修正。由观测残差图 1b 可知, 除了观测间断外, 原始记录中还存在许多较大的掉格, 采用 Tsoft 预处理技术对一些大的掉格进行自动修正, 对一些小的掉格则利用手工进行修正 (Vauterin, 1998)。基于理论模拟获得的潮汐信号, 利用样条插值方法填补空缺数据, 同时对各种噪声信号进行预处理, 消去尖峰和某些非规则信号, 获得的经各种干扰修正和填补空缺数据后的残差由图 1c 给出。该曲线明显地显示了仪器的长周期漂移特征。修正后的观测残差消除了各种噪声信号的影响, 后续的分析说明这种可视化界面获得的预处理结果的可信度较高。为方便比较, 图 1d 给出了干扰的修正量, 很明显地显示了修正的掉格和间断。采用恢复法将修正后的残差加上理论潮汐信号获得经各种噪声信号修正后的重力潮汐观测值。为方便后续的数据分析, 对修正后的每分钟采样数据进行滤波。获得每小时采样值, 实施标定获得观测重力潮汐变化值(图 2a)。

2 数值结果与讨论

采用日本水泽天文台 Tamura 和 Sato 研制的 Baytap-G 潮汐分析方法, 对 ET20 和 SG 观测数据实施同步分析处理 (Tamura, Sato, 1991), 对观测残差和台站气压变化作回归分析获得大气重力导纳值, 然后实施观测潮汐的气压改正。由此方法测定的气压重力导纳值分别为 $(-0.344\ 26 \pm 0.022\ 01) \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{hPa}$ (ET20) 和 $(-0.352\ 59 \pm 0.002\ 40) \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{hPa}$ (SG)。我们测定了 ET20 和 SG 观测中的 20 个日波、10 个半日波和一个三分之一日波的潮汐振幅因子和相位滞后结果, 12 个主日波和 9 个主半日波的结果由表 1 给出。数值结果表明, 潮汐频段内 O_1 波的标准差为 0.004 52 (ET) 和 0.000 49 (SG), M_2 波的标准差为 0.000 51 (ET) 和 0.000 06 (SG)。综合日波、半日波和三分之一日波在内的标准差分别为 $0.204\ 6 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (ET20) 和 $0.022\ 3 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (SG)。这说明 ET20 重力仪的观测精度要比超导重力仪的观测精度低一个量级。

为了方便对 ET20 弹簧重力仪的漂移、气压效应和残差作深入研究, 图 2a 给出了经各种噪声信号修正和修补空缺后的重力潮汐观测。将它进一步分解成潮汐分量(图 2b)、漂移(图 2c)、大气重力信号(图 2d)和残差(图 2e)4 个部分。由图 2 可知, 该仪器的漂移很大, 变化范围从 $33.797 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \sim 734.994 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。这一仪器漂移现象是由于弹簧的蠕变性造成的, 这是弹簧型重力仪本身最大的缺陷, 当然, 可以用 3 次样条函数模拟有规则的长周期漂移并加以消除, 但由于重力场的长周期变化信号与仪器的漂移信号重叠在一起, 我们很难将两者精确地分离, 因此, 在利用弹簧型重力仪研究重力场长周期信号时应引起足够地重视。为了方便比较, 我们检查了同期超导重力仪观测的漂移情况, 发现由超导重力仪观测的长周期漂移在 $1.2 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 量级, 这说明超导重力仪不仅观测精度高, 而且具有十分稳定的特点。图 2d 是由于气压引起的重力场变化信号, 图 2e 给出的重力残差主

要反映了台站的背景噪声, 其量级在 $\pm 0.1 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 量级.

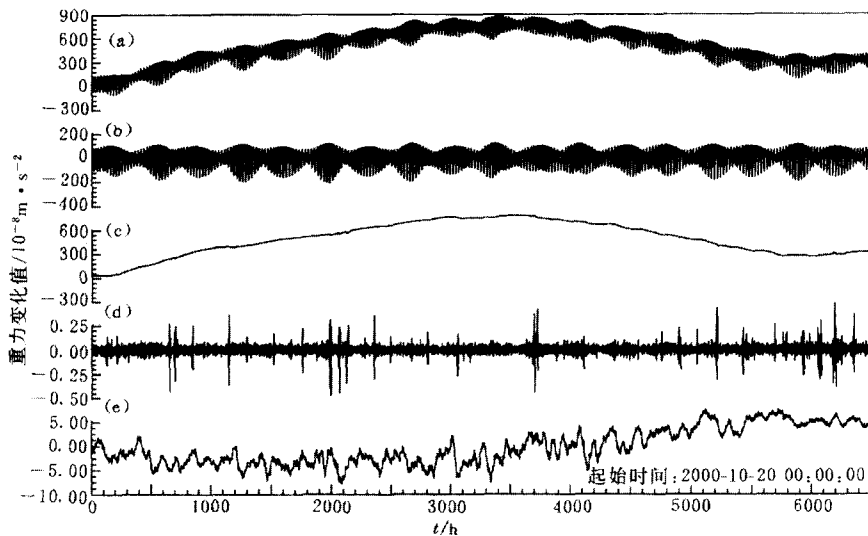


图2 经预处理后的观测值(a)、潮汐分量(b)、长周期飘移部分(c)、大气重力信号(d)和残差(e)

为了研究重力潮汐观测中的海洋负荷信号, 基于卫星测高获得的最新 Csr3.0 全球海潮模型、中国近海区域海潮模型和标准地球模型负荷格林函数, 利用直接褶积积分方法计算了 8 个主要潮波海潮对重力场观测的影响, 采用插值方法获得了其它几个小型潮汐波的负荷矢量(孙和平等, 1999). 表 1 列出了经海潮改正前后的 ET20 和 SG 潮汐振幅因子以及相位滞后分析结果. 为方便对比, 表中还列出了 DDW 潮汐模型数值(Dehant *et al.*, 1999).

对表 1 的数值结果分析可知, 经海潮改正后 ET20 的观测振幅因子大大降低了, 更接近于理论地球潮汐模型, 振幅因子之差由海潮改正前的 2.206% 降低到 0.627% (O_1 波) 和由 0.629% 降低到 0.066% (M_2 波). 相位滞后的改正效果也较明显, 由改正前的 -0.612° 降低到 -0.294° (O_1 波) 和由 -0.556° 降低到 -0.289° (M_2 波). 这一特征与 SG 潮汐参数海潮改正后的结果类似(表 1). 比较 ET20 和 SG 观测的两组结果发现, 经海潮改正后 O_1 波的振幅因子相差 0.03%, 十分接近; M_2 波的振幅因子相差达 0.5%, 这一差异仍在观测与理论误差范围内. 另外, 经海潮改正后的相位滞后相差 0.08° (O_1 波) 和 0.03° (M_2 波), 两者十分接近. 这说明 ET20 获得了与 SG 相近的潮汐参数, 验证了 ET20 重力仪标定结果的正确性; 同时也证明了尽管 ET20 重力仪已有 20 年的历史, 但目前仍然处于良好状态, 可用于地球重力场的时间变化观测.

3 结论

根据以上数值结果和讨论可得出如下初步结论: 基于同一台站由 SG 观测获得的高精度潮汐分析结果, 采用主要潮波振幅因子加权求和的方法, 可有效测定 ET20 弹簧型重力仪记录格值, 同时也说明近期的数据采集系统改装是成功的. 由 ET20 获得的主波潮汐参数与由 SG 获得的相应结果十分接近, 说明 ET20 仪器处于良好状态, 能有效记录到潮汐频段内的

表 1 海潮改正前后重力潮汐振幅因子和相位滞后结果的比较

波群	LCR-ET20 弹簧型重力仪				GWR 超导重力仪				DDW 理论值 δ_0
	海潮改正前		海潮改正后		海潮改正前		海潮改正后		
	δ_T	$\Delta\varphi/(\circ)$	δ'_{ET}	$\Delta\varphi'(\circ)$	δ_{SG}	$\Delta\varphi/(\circ)$	δ'_{SG}	$\Delta\varphi'(\circ)$	
σ_1	1.217 03	-3.406	1.192 71	-3.532	1.189 36	-0.026	1.165 00	-0.085	1.154 10
Q_1	1.174 54	-1.802	1.152 82	-1.675	1.186 07	-0.283	1.164 50	-0.129	1.154 18
ρ_1	1.175 70	-1.549	1.154 45	-1.389	1.181 60	-0.243	1.160 43	-0.060	1.154 19
O_1	1.179 64	-0.612	1.161 42	-0.294	1.179 33	-0.538	1.161 13	-0.219	1.154 18
π_1	1.152 10	-1.596	1.139 97	-1.191	1.188 39	0.731	1.176 61	1.147	1.150 75
P_1	1.159 36	-0.520	1.147 28	-0.103	1.161 65	-0.474	1.149 59	-0.058	1.149 23
K_1	1.150 75	-0.514	1.139 18	-0.084	1.154 65	-0.539	1.143 08	-0.111	1.135 31
ψ_1	1.002 29	-2.422	0.994 68	-2.120	1.176 53	0.698	1.169 17	0.975	1.266 90
ϕ_1	1.099 83	-1.266	1.089 78	-0.882	1.194 58	1.040	1.184 89	1.412	1.169 84
θ_1	1.098 56	1.375	1.091 18	1.721	1.181 77	-0.386	1.174 17	-0.076	1.156 91
J_1	1.151 02	0.594	1.143 96	0.901	1.174 74	-0.861	1.167 51	-0.569	1.156 71
OO_1	1.139 82	-5.555	1.136 46	-5.459	1.168 91	-0.611	1.165 74	-0.503	1.156 18
$2N_2$	1.201 71	-1.454	1.180 86	-1.062	1.180 05	-0.193	1.159 45	0.229	1.161 79
μ_2	1.195 74	0.632	1.176 40	1.046	1.184 95	0.079	1.165 51	0.488	1.161 79
N_2	1.173 34	-0.799	1.160 39	-0.481	1.179 06	-0.474	1.166 23	-0.154	1.161 79
v_2	1.176 55	-1.718	1.164 30	-1.419	1.179 48	-0.811	1.167 40	-0.504	1.161 79
M_2	1.169 10	-0.556	1.161 02	-0.289	1.175 60	-0.526	1.167 52	-0.260	1.161 79
L_2	1.129 43	-3.881	1.122 91	-3.644	1.174 45	-0.678	1.168 18	-0.433	1.161 79
T_2	1.248 47	0.071	1.241 71	0.316	1.184 13	-1.210	1.177 19	-0.958	1.161 79
S_2	1.164 89	-0.796	1.157 94	-0.541	1.170 69	-0.733	1.163 75	-0.479	1.161 79
K_2	1.153 74	-0.703	1.146 23	-0.428	1.171 23	-0.471	1.163 75	-0.199	1.161 79

大气和海洋重力信号。但是，由于弹簧蠕变特征导致仪器飘移十分大，在研究长周期重力信号时，应注意用适当方法消除仪器飘移成分。因此，只要维护适当，具有 20 年历史的 ET20 仪器仍具有良好性能，用于研究潮汐和非潮汐频段内地球动力学问题，如地壳运动、地震监测、大气和海洋重力潮汐信号等。

参 考 文 献

- 孙和平, 许厚泽. 1997. 国际地球动力学合作项目的实施与展望[J]. 地球科学进展, 12(2): 152~157
- 孙和平, 许厚泽, 陶国祥, 等. 1997. 用超导重力仪观测数据精密测定地球潮汐常数[J]. 地壳形变与地震, 18(4): 1~10
- 孙和平, 许厚泽, 罗少聪, 等. 1999. 用超导重力仪的潮汐观测资料研究海潮模型[J]. 测绘学报, 28(2): 115~120
- Becker E, Groten E, 陶国祥, 等. 1990. ET 型潮汐重力仪的改进[J]. 测绘学报, 19(3): 229~235
- Dehant V, Defraigne P, Wahr J. 1999. Tides for a convective Earth[J]. J Geophys Res, 104: 103 5~105 8
- Goodkind J. 1991. The superconducting gravimeters principles of operation, current performance and future prospect [A]. In: Poitevin C ed. Proceedings of the Workshop on Non-tidal Gravity Changes[C]. Luxembourg: Published via Conseil de L' Europe Cahiers du Centre Européen de géodynamique et de séismologie, 81~90
- Tamura Y, Sato T. 1991. A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion [J]. Geophys J Inter, 104: 507~516
- Vauterin P. 1998. Graphical and interactive software for the analysis of Earth tide data [A]. In: Paquet P, Ducarme B eds. Proc 13th Int Sympos on Earth Tides[C]. Brussels: Published via Observatoire Royal de Belgique, Série Géophysique, 481~486

ANALYSIS AND COMPARISON OF THE TIDAL GRAVITY OBSERVATIONS OBTAINED WITH LCR-ET20 SPRING GRAVIMETER

Sun Heping Chen Xiaodong Liu Ming Zhou Baili

(Key Laboratory of the Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 54 Xu-Dong Road, 430077, Wuhan, China)

Abstract: Based on the tidal gravity observations recorded with LCR-ET20 spring gravimeter at Wuhan international fundamental tidal gravity station, the characteristics of the ET20 and the atmospheric and oceanic gravity signals are studied systematically by using international standard data pre-processing and analysis methods, and by comparing to those obtained with superconducting gravimeters (SG) at same station. The numerical results show that the identical tidal gravity parameters are obtained with ET20, it can be used effectively to record temporal change of the gravity field, though that the accuracy of the ET20 is one order lower than that of the SG, and also the large drift induced by the spring creep characteristics.

Key words: spring and superconducting gravimeters; atmospheric and oceanic influence; study of the instrument characteristics